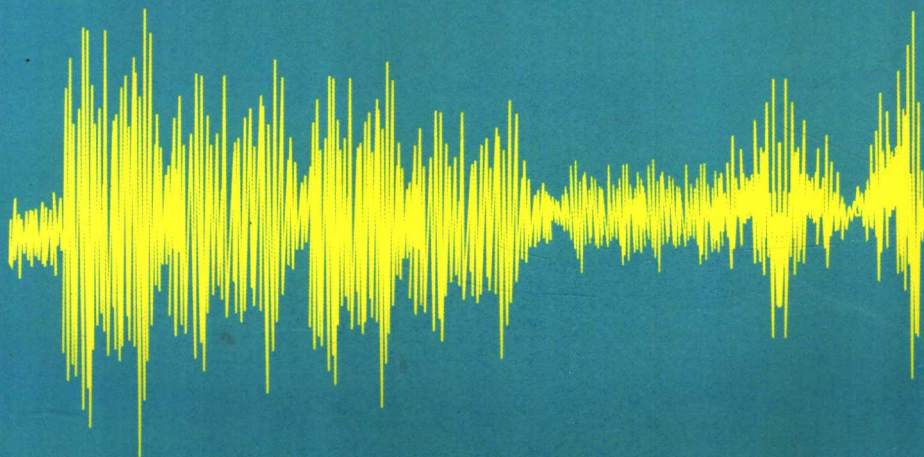


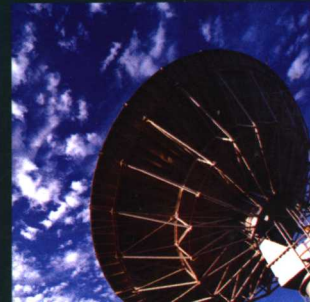
盲信号处理

Blind Signal Processing

马建仓 牛奕龙 陈海洋 编



國防工業出版社
National Defense Industry Press



盲信号处理

马建仓 牛奕龙 陈海洋 编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

盲信号处理/马建仓,牛奕龙,陈海洋编. —北京:
国防工业出版社,2006.6

ISBN 7-118-04507-1

I. 盲... II. ①马...②牛...③陈... III. 信号处
理 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 036062 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18¼ 字数 441 千字

2006 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

盲信号处理是 20 世纪最后 10 年迅速发展起来的研究领域,是人工神经网络、统计信号处理以及信息理论相结合的产物。作为这几门学科相互渗透和相互融合而产生的新学科,它具有重要的理论和应用价值,越来越多科技工作者已经认识到其独特作用。盲信号处理针对传感器检测的混合信号(多个源信号的线性和非线性混合),在源信号未知、信号传输通道特性未知的情况下,仅通过分析检测信号(或观测数据)来获得源信号及信号传输通道特性。它为解决此类问题提供了全新的思路和各种方法。

盲信号处理发展至今,时间虽然不长,但在算法上得到了深入的研究,已成为现代数字信号处理的一个十分活跃的领域。盲信号处理的发展与统计信号处理、神经网络信号处理、通信信号处理、智能信号处理、时频分析等现代信号处理各分支密切结合,形成多分支交叉,可应用于电子信息、通信、生物医学、图像增强、雷达、地球物理信号处理等许多领域;尤其是在无线通信和生物医学等方面的成功应用,促使其迅速发展,是当前学术界的一个研究热点。

盲信号处理的内容主要包括盲源分离、独立分量分析、盲辨识、盲解卷/盲均衡和盲多用户检测、盲波束形成等。针对源信号线性混合、卷积混合及非线性混合方式以及观察信号是单通道或多通道,根据采用的统计信号处理(二阶统计量、高阶统计量)、神经网络逼近、信息论等原理,就有相应的目标函数,根据不同的目标函数求解方法,算法各种各样,分别适合不同的应用环境和场合。

本书主要介绍盲信号处理的基本概念、模型、学习算法及最新的研究成果以及研究方法,给出了一些基本的算法。全书共分为 9 章,第 1 章是盲信号处理概述;第 2 章介绍了盲信号处理的数学基础;第 3 章介绍了主、次分量分析;第 4 章介绍了白化预处理和二阶统计量特征值分解盲辨识方法;第 5 章盲源分离和独立分量分析,包括独立分量分析方法、盲源分离的内在联系与区别、独立分量的自然梯度法、独立分量分析的自适应算法、带噪信号的盲分离和独立分量分析的稳健算法、盲信号抽取等内容;第 6 章主要介绍独立分量分析的神经网络方法;第 7 章介绍源信号非线性混合的 BSS 和 ICA;第 8 章介绍盲均衡和辨识的基本方法,包括多通道盲解卷的自然梯度法、独立分量分析与盲解卷中的估计函数及其高效算法;第 9 章介绍盲自适应多用户检测;附录 A 给出了一些盲处理算法的 Matlab 程序;附录 B 给出了盲多用户检测的相关 Matlab 程序,这些程序都是运行通过的,以供参考。

为方便读者自学,本书各章相对独立,每章的内容包括基本模型、假设、研究思路、重要算法、重要结论、算例等,也有一些定理和算法的推导,未证明的部分可参考相应的文献。本书列出了大量的参考文献以便查阅,虽然远不全面,但是关键文献以及论述未来发展方向的文献基本具备。

2000 年我们在涉及盲信号处理科技资料时,被其理论方法的深奥以及应用前景所吸引。当时国内很少有专门的书籍,国际上几本专著对于我们学习起了很大的作用。2003 年—2005 年多位研究生翻译了几本专著,并做了一些初步研究,我们意识到如果能将这些内容综合为一本书,必将对我国在这方面的研究及应用有一定的促进作用。另外,随着盲信号处理研究的不断深入和应用范围的不断扩展,研究人员逐渐增多,各高等院校也相继为硕士生和博士生开设了该门课程,而国内系统介绍盲信号处理理论、最新发展以及研究方法的书籍较少,国内也需要这方面的书。这就是启动编写这本书的动机。在我们编写整理这些内容时,深深感到盲信号处理方面理论较深、内容很多,我们的水平有限且深入程度不够,确实存在一些困难,曾经反复考虑,深信只要能对我国盲信号处理的研究和应用起一点促进作用,能对读者有些帮助,就应该完成这项工作。参考文献列出了几乎所有引用论文和专著的出处,在这里对所有作者表示衷心的感谢!

本书编写过程中,多位研究生参加了内容整理、文字输入修改等工作,除署名的三位作者外,张小兵同志参编了盲多用户检测及附录 Matlab 程序部分;在编写过程中多位同志给予了鼓励和良好的建议;在出版过程中,学校领导及相关职能部门、出版社等给予了大力的支持,在此一并表示衷心的感谢!

由于盲信号处理属于多学科交叉领域,研究范围很广,且研究成果层出不穷,我们虽然做了大量的综合工作,但由于水平有限,书中错误和不妥之处难免,恳请批评指正。可通过电子邮件联系我们 www.blindprocessing@163.com。

作 者
2006 年 1 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 盲信号处理概念和盲源分离的发展	1
1.2 盲信号处理的应用	7
1.3 本书的结构与内容安排	8
1.4 使用本书的建议	9
参考文献	9
第 2 章 盲信号处理的数学基础	13
2.1 矩阵运算的基本公式	13
2.1.1 矩阵的相关概念	13
2.1.2 矩阵运算公式	13
2.1.3 向量、矩阵及其函数的微分	14
2.1.4 矩阵的求逆规则	16
2.1.5 矩阵伪逆(Moore-Penrose 逆)的性质	16
2.1.6 矩阵直积及矩阵乘积	17
2.1.7 向量及矩阵的数学期望	17
2.1.8 矩阵及行列式的微分	18
2.1.9 循环矩阵	19
2.2 不等式和几何距离	21
2.2.1 不等式	21
2.2.2 几何距离	22
2.3 信息论的基本概念	23
2.3.1 不确定性	23
2.3.2 可分离性	24
2.3.3 信息和熵的定义及其关系	25
2.3.4 信息不增加性原理	27
2.4 高阶统计量	28
2.4.1 高阶统计量的定义	28
2.4.2 高阶累积量的计算	30
2.4.3 高阶累积量的重要性质	32
参考文献	34
第 3 章 主分量和次分量分析	35

3.1	主分量分析的发展简况	35
3.2	主分量分析的基础知识	38
3.2.1	主分量分析的基本思想	38
3.2.2	主分量的定义、性质与求法	42
3.2.3	样本协方差矩阵的估计	43
3.2.4	信号与噪声子空间的估计准则	44
3.3	主分量提取的稳健递归最小二乘算法	46
3.4	基于广义能量函数的快速自适应主分量提取算法	49
3.4.1	广义能量函数	50
3.4.2	梯度学习算法与 RLS 学习算法	52
3.4.3	GEF 算法的性能	54
3.5	基于加权信息准则的快速自适应主分量提取算法	54
3.5.1	加权信息准则	55
3.5.2	算法推导	56
3.6	自适应次分量提取算法	59
3.6.1	信息量最小化准则	60
3.6.2	AMEX 算法的推导	61
3.7	主分量分析和次分量分析的统一算法	63
3.7.1	PCA 和 MCA 的统一框架	63
3.7.2	PCA 和 MCA 的统一算法	64
	参考文献	65
第 4 章	白化预处理和二阶统计量特征值分解盲辨识方法	68
4.1	空域解相关和盲分离	68
4.1.1	空域解相关的基本方法	68
4.1.2	自适应空域解相关	70
4.2	基于二阶统计量特征值分解的盲辨识方法	75
4.2.1	混合模型和盲辨识	75
4.2.2	同时对角化盲辨识方法	76
4.3	盲辨识的相关抵消法	79
4.3.1	标准混合矩阵和噪声协方差矩阵的估计方法	79
4.3.2	利用相关抵消原理的混合矩阵盲辨识	80
	参考文献	82
第 5 章	盲源分离和独立分量分析	85
5.1	独立分量分析的概念	85
5.2	BSS、ICA、PCA 及白化处理	90
5.2.1	盲源分离(BSS)和独立分量分析(ICA)	90
5.2.2	主分量分析和 ICA	91

5.2.3	白化处理和 ICA	91
5.3	ICA 或 BSS 的基本原理	93
5.3.1	互信息量最小化目标函数	94
5.3.2	信息传输最大化或负熵最大化目标函数	95
5.3.3	ICA 的最大似然目标函数	95
5.3.4	各种目标函数的等价性	96
5.3.5	ICA 方法的扩展和待解决的问题	96
5.4	独立分量分析的自然梯度方法	98
5.4.1	自然梯度盲处理方法的目标函数	98
5.4.2	ICA 的自然梯度学习算法	100
5.4.3	自然梯度 ICA 算法的稳定性分析	104
5.4.4	盲源分离的广义自然梯度算法	105
5.4.5	盲源分离的不完整自然梯度算法	106
5.5	基于最大信噪比的盲源分离算法	109
5.5.1	信噪比目标函数	109
5.5.2	分离算法的推导	110
5.5.3	算法的可分离性	110
5.5.4	仿真实验	111
5.6	基于峭度的盲源分离算法	113
5.6.1	源信号的概率密度函数、激活函数及峭度	113
5.6.2	盲源分离算法	114
5.6.3	仿真实验与分析	115
	参考文献	118
第 6 章	独立分量分析的神经网络算法	122
6.1	J-H 递归神经网络盲处理算法及其改进	122
6.1.1	独立分量分析的递归神经网络方法	122
6.1.2	具有消噪能力的递归神经网络 ICA 方法	126
6.1.3	ICA 的前向神经网络模型及其学习算法	130
6.1.4	ICA 的多层神经网络模型及其学习算法	133
6.2	仿真实例	134
6.3	序贯盲信号抽取的神经网络方法	137
6.3.1	盲信号抽取及其特点	137
6.3.2	基于峭度的级联神经网络盲信号抽取学习算法	138
6.3.3	盲信号抽取的定点算法	143
6.3.4	序贯抽取和紧缩过程	145
	参考文献	146
第 7 章	非线性混合信号的 BSS 和 ICA	149

7.1	非线性混合信号 BSS 和 ICA 的概念	149
7.2	非线性混合信号 BSS 和 ICA 的存在性与唯一性	150
7.2.1	非线性混合信号 BSS 和 ICA 的不确定性	150
7.2.2	光滑映射的盲分离性	152
7.2.3	具有结构约束的非线性混合信号的盲分离性	153
7.2.4	源信号先验信息的利用	157
7.3	非线性混合信号的基本分离方法	160
7.3.1	后置非线性混合信号的分离方法	160
7.3.2	一般非线性混合信号的分离方法	162
7.3.3	非线性混合信号的 RBF 神经网络盲源分离方法	164
	参考文献	170
第 8 章	盲均衡和盲辨识的基本方法	173
8.1	盲均衡和盲辨识的技术背景	173
8.1.1	盲均衡技术	173
8.1.2	盲辨识技术	174
8.2	盲均衡和盲辨识技术基础	175
8.2.1	盲均衡系统模型	175
8.2.2	多用户信道模型	177
8.2.3	多通道盲均衡模型及其可分离性	181
8.2.4	盲均衡和盲辨识的条件	184
8.3	盲均衡和盲辨识的基本方法简介	187
8.3.1	平稳信号的盲均衡	187
8.3.2	循环平稳信号的盲均衡	188
8.3.3	基于神经网络和模糊理论的盲均衡	190
8.4	Bussgang 盲均衡算法	191
8.4.1	Bussgang 盲均衡算法的原理	191
8.4.2	恒模盲均衡 Godard 算法	194
8.5	盲解卷或盲均衡的自然梯度学习算法	198
8.5.1	单输入多输出系统的盲均衡模型和可均衡条件	198
8.5.2	SIMO 系统的盲均衡或盲解卷的自然梯度学习算法	199
8.5.3	MIMO 系统盲均衡的基本模型和条件	200
8.6	基于高阶累积量的盲均衡方法	202
	参考文献	208
第 9 章	盲自适应多用户检测	210
9.1	多用户检测技术	210
9.2	同步 CDMA 信号盲多用户检测模型	212
9.3	最小输出能量(MOE)盲多用户检测算法	213

9.4	恒模(CMA)盲多用户检测算法	215
9.5	Kalman 滤波多用户检测	218
9.6	子空间盲多用户检测	220
9.6.1	子空间预测逼近跟踪盲多用户检测算法(PAST)	221
9.6.2	紧缩预测逼近子空间跟踪盲多用户检测算法(PASTd)	222
9.6.3	正交预测逼近子空间跟踪算法(OPAST)	223
9.6.4	仿真分析	224
	参考文献	224
附录 A	一些盲处理算法的 Matlab 程序	226
附录 B	盲多用户检测相关的 Matlab 程序	253
附录 C	常用的数学符号	274
附录 D	常用的缩略语	277
附录 E	盲信号处理的部分相关网址	280

第 1 章 概 论

盲信号处理作为计算智能学的核心研究内容,是 20 世纪最后 10 年迅速发展起来的一个新研究领域,是人工神经网络、统计信号处理、信息理论相结合的产物,已经成为一些领域研究与发展的重要课题,特别是在生物医学、医疗图像、语音增强、远程传感、雷达与通信系统、地震勘探、地球物理、计量经济学、数据采掘等方面均具有突出的作用。本书介绍了盲信号处理(简称盲处理)的基本理论和方法。

1.1 盲信号处理概念和盲源分离的发展

在现实生活及自然界中存在大量的信息,人们通过传感器检测获取含有信息的数据(或信号),并处理这些数据来获取信息,对这些信息进一步加工来获得知识和改造自然的能力。然而,传感器检测的往往是多个成分(包括噪声、无用的信号)混合在一起的信号,而且是未知的,又由于信号传输的通道特性复杂未知,因此,要得到反映某物理特性真实原始的源信号很困难,给人们的处理带来很大困难。多年来人们主要通过传感器检测、信号处理两种途径来获取所需的有用信号。在传感器检测方面人们一直追求对真实源信号的检测,新原理、新方法、新技术不断出现,尽可能将传感器布置靠近源信号位置,采用多个传感器等措施检测真实的源信号。对于有些情况(如地震信号等)较真实源信号检测就更加困难。信号处理的任務就是从大量的数据中提取人们所希望得到的成分,进而获得有用的信息。由于传感器检测的信号是混合信号,因此源信号的分离就是信号处理的基本任务。虽然各种信号处理方法,如 IIR 滤波、FIR 滤波、自适应滤波、时频分析、小波理论、统计信号处理、神经网络信号处理等得到应用并起到很大作用,而盲信号处理(Blind Signal Processing, BSP)与传统的处理方法完全不同,它是对源信号和传输通道几乎没有可利用信息的情况下,仅从观测到的混合信号中提取或恢复出源信号的一种信号处理方法。

盲处理理论是信号处理领域的一个新的研究方向,同时也是一个引人注目的应用热点。盲处理牵涉到诸如信息理论、神经网络、统计信号处理和优化理论等领域。近年来,对于盲处理的研究受到了国内外广泛的重视,研究也越来越广泛和深入,理论和实际应用都得到了很大的发展,每年都有大量的文章发表。

1. 盲处理的概念

盲信号处理工作原理如图 1.1.1 所示, $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ 是未知源信号向量, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 是混合信号向量(或观测信号、传感器检测信号), $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_n)^T$ 是噪声信号向量(这里仅考虑加性噪声),输出 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 待求的分离信号向量(或源信号 $\mathbf{s}$ 的估计), $\mathbf{H} = (h_{ij})_{n \times n}$ 是未知混合矩阵(或源信号传输通道混合特性矩阵), $\mathbf{W} = (w_{ij})_{n \times n}$ 是待求的分离矩阵。在图 1.1.1 中,源信号个数、有用源信号分量和无用源信号分

量、源信号特性、源信号传输混合通道特性、噪声特性等都是未知的,观测信号 $x(k)$ 是传感器检测信号,被认为是已知量。 $x(k)$ 中含有未知(或盲的)源信号和未知混合系统的特性。处理具有盲特性的信号 $x(k)$,以估计出源信号(或分离出源信号、或恢复源信号)或辨识出混合系统特性(估计出混合矩阵)就是盲信号处理的任务。实际中,盲处理的例子很多,例如,在移动通信应用中,接收端不知道发射的源信号,又由于“移动”的原因信道特性也在不断变化,因而也是未知的,人们必须仅由接收信号去恢复原始源信号本身;又如在地震勘探中,震源信号和传播通道都是不可知的,同样只能通过接收的信号去确定地层信息;再如所谓的“鸡尾酒会”问题,在嘈杂的大厅中,人耳能够准确地捕捉所关心和感兴趣的语音,而现有的仪器设备却很难做到这一步,必须通过盲信号处理技术,才能从麦克风接收的混合语音信号中恢复出感兴趣人员的语音信号。由于各个领域实际检测信号都可以视为混合信号 $x(k)$,大量的信号处理任务是寻求源信号的最佳估计,因此,盲处理应用范围很宽,几乎涉及各个领域。由于盲处理仅利用观测信号和很少的先验知识,可采用各种方法,因此其理论方法比较复杂,涉及的基础知识较广。由于源信号特性差异、混合方式不同,混合系统特性时变、噪声特性不同、源信号个数动态变化、实际检测信号特性不同等原因,已有的各种盲处理方法都有一定的适用范围。

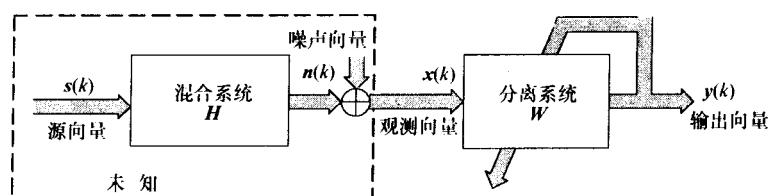


图 1.1.1 盲处理原理框图

由上面的简述可知,盲信号处理的实质及主要任务就是对于未知混合系统在其输入信号完全未知或仅有少量先验知识的情况下,仅由系统的输出信号(即混合信号)来重构输入信号或进行系统辨识。如果盲处理中,用到了源信号和传输通道等先验知识,实际并不全盲,因此也称为“半盲处理”。实际中,对于工程问题,应用一些先验知识往往可简化盲处理方法或提高处理效率和效果,因此,充分利用先验知识也应受到重视。

顺便指出,盲处理前的信号预处理常常很重要,这些预处理包括去均值、幅值归一化或单位化、限制带宽、信号分解、白化解相关及主分量提取等。另外,盲处理算法的计算量通常很大,常常限制了实时实现,提高算法效率或采用高速硬件是有效的技术途径。

2. 盲信号处理方法及分类

在盲信号处理中,就源信号经过传输通道的混合方式而言,其处理方法可分为线性瞬时混合信号盲处理、线性卷积混合信号盲处理和非线性混合信号(后非线性混合、完全非线性混合等)盲处理三类。根据通道传输特性中是否含有噪声、噪声特性(白噪声、有色噪声等)、噪声混合形式,可分为有噪声、无噪声盲处理,含加性噪声和乘性噪声混合信号盲处理等。目前的盲分离算法大部分集中在源信号线性瞬时混合问题的盲处理,考虑噪声情况的盲信号处理研究主要针对加性白色或有色高斯噪声等,含噪声信号的盲处理算法通常称为稳健算法。针对源信号和混合信号是单路或多路,又可分为单输入多输出(SIMO)系统的盲处理和多输入多输出系统(MIMO)的盲处理。

盲处理的目的可分为盲辨识和盲源分离两大类。盲辨识的目的是求得传输通道混合矩阵(线性混合矩阵、卷积混合矩阵、非线性混合矩阵等)。盲源分离的目的是求得源信号的最佳估计。当盲源分离的各分量相互独立时,就称为独立分量分析,即独立分量分析是盲源分离的一种特殊情况。当盲源分离是逐个分离并紧缩实现时称为盲抽取。

盲处理的大部分方法是依据一定的理论构造目标函数的无监督学习方法。盲处理采用的目标函数主要有负熵(非高斯性最大时就完成独立分量分离)、高阶累计量(非高斯性度量参数,常用四阶累计量)、互信息量(互信息量最大可获得最大的独立性)、KL 散度、最大似然估计等。确定了目标函数后,就需要用一定的算法寻优处理,实现算法主要是各种自适应优化算法。

盲处理应用于通信信号处理主要有盲均衡 / 盲解卷、盲多用户检测、盲波束形成等。盲均衡通常指信道的盲辨识及盲解卷。盲均衡可以补偿信道时变带来的信号畸变,盲均衡方法有平稳信号的盲均衡、循环平稳信号的盲均衡、基于神经网络和模糊理论的盲均衡等。盲多用户检测技术是只使用待检测用户的观测数据抵消多址干扰的盲处理技术。盲自适应多用户检测器技术主要包括线性盲多用户检测、群盲多用户检测、非高斯信道中的稳健盲多用户检测、空时盲多用户检测和 turbo 盲多用户检测等。其基本内容线性盲自适应多用户检测方法可分为解相关多用户检测、MMSE 多用户检测、最小输出能量(MOE) 盲多用户检测、恒模算法(CMA) 盲多用户检测、卡尔曼滤波器盲多用户检测和子空间盲多用户检测等。

下面简介盲辨识(BI)、盲解卷积(BD)/ 盲均衡(BE)、盲源分离、盲抽取(BE)、独立分量分析(ICA) 概念如下。

盲辨识:盲辨识是针对源信号传输通道混合特性辨识问题提出的。在传统的系统辨识方法中,需同时已知系统的输入信号和输出信号,再利用经典的辨识算法就可较精确地估算出系统的特性参数,从而完成系统辨识任务。而对于盲辨识方法而言,系统的输入信号是未知的,仅仅已知系统的输出,要由输出信号确定源信号传输通道(或混合系统) 的模型结构及特性参数,从而完成系统的辨识任务。

盲解卷积及盲均衡:盲解卷积是针对源信号卷积混合的分离问题提出的。当源信号的传输通道具有卷积特性时,传感器检测的信号应该是源信号和通道脉冲响应函数的卷积,这时已不是简单的瞬时线性混合且有时间延迟,对卷积混合信号进行分离通常称为解卷积,它是盲信号处理的基本任务之一。传统解卷积方法是在已知系统模型参数(如脉冲响应、传递函数) 和系统输出的情况下估计系统的输入,而盲解卷积则是在混合系统特性参数(如脉冲响应函数) 未知的情况下,仅由观察的混合信号来重构系统输入——源信号。在通信系统中,把完成解卷积功能的器件叫做均衡器,意思是补偿(均衡) 由于信道变化而带来的对传输信号的畸变,从而提高识别率。它与传统的解卷积方法的重要区别在于可以应用到时变系统及非最小相位系统中,因而在数字通信和地震勘探等领域中具有重要价值。当用盲处理方法实现均衡时就称为盲均衡。多通道盲解卷积及盲均衡是针对多通道解卷积及盲均衡问题提出的。

盲源分离及盲抽取:盲源分离是针对从检测的混合信号中估计或恢复源信号的问题提出的。盲源分离(BSS) 是指源信号、传输通道特性未知的情况下,仅由观测信号和源信号的一些先验知识(如概率密度) 估计出源信号各个分量的过程。一个典型的例子就是“鸡尾酒会”问题,仅根据多个麦克风检测信号分离或恢复出某语音源信号。盲抽取是从观测信号向

量中逐个地分离出感兴趣的源信号分量,甚至可以预先不知道源信号的个数。盲源分离与盲信号抽取的区别在于盲源分离是从观测信号向量中同时分离出全部源信号,而盲信号抽取是逐个分离源信号。独立分量分析(ICA)是针对独立源信号混合的各分量分离问题提出的,是BSS的特例。

实际上,盲源分离包含盲辨识,这是因为正确辨识混合系统后,信号的分离问题迎刃而解。目前,独立分量分析通常研究的是源信号线性瞬时混合的求解问题,而盲解卷积则是一种更为实际的盲源分离方法,其源信号混合模型是卷积混合。卷积混合模型比较接近实际,这是因为:① 实际中每一个源信号不会同时到达所有的传感器,不同的源信号到达传感器时延不同,延时值的大小取决于传感器与源信号间的相对位置以及信号的传播速度;② 源信号可经过多种路径传播到达传感器(即多径效应)。假设信号是线性混合的,则从传感器观测到的信号是源信号各种延时的线性混合。解决此类问题的盲信号处理方法就是盲解卷积。特别地,ICA方法也可被用于盲解卷积。

此外,盲信号处理还包括许多重要内容,例如盲波束形成、频域盲解卷积、因子分析(FA)及独立因子分析(IFA)等。限于篇幅,本书只介绍盲处理的基本内容,其余内容请参考相关文献。

3. 盲源分离的发展

盲信号处理的内容比较多,本书仅就盲源分离发展历史简介如下:

1986年4月13日~16日,法国学者 Jeanny Herault 和 Christian Jutten 在美国犹他州举行的 Neural Network for Computing 会议上作了一篇题为 Space or time adaptive signal processing by neural network models 的研究报告,提出了递归神经网络模型和基于 Hebb 学习律的学习算法,以实现两个独立源信号混合的分离。这一开创性的论文在信号处理领域中揭开了新的一章,即盲源分离问题的研究。

1987年,Giannakis^[27]等人提出了BSS的可辨识问题,且引入了三阶累积量,但他们的算法需要穷举的搜索计算。

1988年、1989年,Linsker^[1,26]发表了对盲处理研究具有重要作用的几篇文章,提出了最大互信息准则,该准则的基本形式非常适合建立自组织模型和特征映射。

1991年,J. Herault 和 C. Jutten^[2],E. Sorouchyari^[3]、P. Comon^[4]在 S. Processing 上发表了关于盲信号分离的三篇经典文章,标志着盲分离研究的重大进展。其中 J. Herault 和 C. Jutten 首创将人工神经网络算法用于 BSS,从而开启了一个新领域。虽然他们的学习算法是启发式的、并且没有明确指出需利用观测信号的高阶统计信息,但是其迭代计算公式已具备后来算法的雏形。同年,L. Tong 和 R. W. Li 等人^[20]给出了较为完善的关于盲分离问题的数学框架,将盲分离问题转化为一个特征值求解问题,从而可以使用已成熟的矩阵分解方法来解决 BSS 问题。

1992年,G. Burel^[5]提出了用BP神经网络实现线性和非线性混合信号盲分离方法。

1994年,P. Comon^[6]将数据处理与压缩的主分量分析(PCA)加以扩展而成为ICA,阐述了独立分量分析这一概念,界定了解决BSS问题的ICA方法的基本假设条件。他明确指出,应该通过使某个称为对比函数(Contrast Function)的目标函数达到极大值来消除观测信号中的高阶统计关联,以实现线性混合的BSS及ICA。他也提出ICA是PCA的扩展和推广。同年,Cichocki^[8]等人提出了著名的自然梯度学习算法。标准的随机梯度算法的基础是

权矩阵的参数空间具有均匀欧氏结构,而当均匀欧氏空间的假设不成立时,就需要更加一般的参数空间结构。基于黎曼空间的自然梯度算法是一种比基于欧氏空间的一般随机梯度算法更有效的学习规则。此外,Oja 与 Karhunen^[13,14] 提出采用高阶统计量的非线性主分量分析盲源分离算法,它是线性主分量分析方法的推广,在正交约束下可以实现信号的分离。

1995 年,A. J. Bell 和 T. J. Sejnowski^[7] 发表了 ICA 发展史中的里程碑文献。他们利用神经网络的非线性特性来消除观测信号中的高阶统计关联,并把盲分离问题归入信息论框架,用信息最大化准则建立目标函数,从而将信息论方法与 ICA 结合起来。文中给出了神经网络式的最优权矩阵迭代学习算法,成为后续各种算法的基础。仿真实验成功地对具有 10 人谈话的“鸡尾酒会”问题给出了很好的分离效果。同年,Delfosse 和 Loubaton^[10] 提出一种紧缩(Deflation)算法。该算法首先从混合信号中分离出一个源信号,从而使问题降阶,逐步提取各个源信号,实际上是一种盲抽取算法。另外,K. Matsuoka^[19] 提出了一种用于非平稳随机信号的算法。由于许多实际信号都是非平稳随机信号(如语音信号),因此该算法有很大的实用性。

1996 年,Cardoso 和 Laheld^[9] 提出了 ICA 学习算法中的“相对梯度”、“等变化性”和有关稳定性及分离精度等重要思路和方法。同年,Pearlmutter^[11] 在 ICA 中引入以最大似然为准则的目标函数,Cardoso^[12] 于 1997 年证明了最大信息方法和最大似然估计方法是等价的。

1997 年,Girolami 和 Fyfe^[15] 受探测投影寻踪(EPP)的启发,使用边缘负熵作为投影指数,而且证明了寻找峭度的投影寻踪法可以抽取一个线性混合的源信号。接着,他们实现了对所有信号的提取。同年,Pham 和 Garat^[16] 通过准最大似然途径对 ICA 的学习算法、稳定性、分离精度和源信号概率密度函数(pdf)的确定作了进一步讨论。

1998 年,Proceedings. of IEEE 的 10 月号的论文集为盲信号处理专辑,文献[17,18]对这一领域的成果作了综述并指出进一步的发展方向。

1999 年 1 月 11 日—15 日在法国的 Aussois 成功召开了首届“独立分量分析与盲信号分离”国际学术会议(International Symposium on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation)。其后几年,芬兰的首都赫尔辛基(Helsinki)(2000 年 6 月 19 日—22 日,第二届)、美国加州圣迭戈(2001 年 12 月 9 日—12 日,第三届)、日本奈良(Nara)(ICA2003,2003 年 4 月 1 日—4 日,第四届)和西班牙格拉纳达(2004,第五届)分别承办了一届 ICA 及 BSS 会议。会议期间,各国科学家发表了大量的论文,内容涉及盲信号处理技术的各个领域,大多具有较高的参考价值。其中,Harri Valpola 等人于 2000 年 ICA 会议发表了两篇关于非线性独立分量分析(NICA)的论文^[42,43],提出利用贝叶斯集合学习(Bayesian Ensemble Learning)方法进行 NICA,同时用多层感知器网络模拟源信号到观测信号的映射,用高斯信号的混合来模拟源信号的分布。2001 年,Ki-Seok Cho 和 Soo-Young Lee 利用 CMOS 芯片实现了经典的基于 Infomax 理论的自然梯度算法^[44],虽然仅为四输入四输出,但可以进行多芯片的扩展,实现更复杂的应用。2003 年,Cardoso 提出将 ICA 应用于天文图像^[45],并取得了令人鼓舞的结果。2004 年,Zhijian Yuan 和 Erkki Oja 提出了一种用于非负独立分量分析(Non-negative ICA)的 Fast ICA 算法^[46],指出了该算法在非负 ICA 这种特殊情况下的应用。

最近几年的国际声学、语音和信号处理大全(IEEE Int. Conf. Acoust Speech, Signal

Processing-ICASSP) 上,每次都有关于盲信号处理的专题,而且信号处理界的权威刊物 IEEE Transaction on Signal Processing 以及 Signal Processing 中,盲信号处理的文章也频繁出现。十几年来,对于盲信号分离问题,学者们提出了很多的算法,每种算法都在一定程度上取得了成功。从算法的角度而言,BSS 算法可分为批处理算法和自适应算法;从代价函数或准则的角度而言,又分为基于神经网络的方法、基于高阶统计量的方法、基于互信息量的方法、基于非线性函数的方法等。

国际上,研究盲源分离问题的著名学者有:美国的 Salk Institutes 神经计算实验室学者 Sejnowski 和 Bell,日本的学者 Amari 和 Cichowski,芬兰学者 Oja,法国学者 Comon、Cardoso 等。盲分离问题发展至今,已有的大部分算法用于解决线性瞬时混合问题,一些具有良好性能的成功算法已经被应用于信号处理领域、语音识别系统、生物医学信号处理、通信信号处理和地震预报等很多领域,并具有广泛的应用前景。近几年,非线性盲分离问题得到了极大的发展,其中后非线性混合模型的算法发展最为全面和迅速,Jutten、M. Babaie-Zadeh、taleb、A. Ziehe 等人提出很多算法解决 PNL 模型的盲分离问题,并且在传感器阵列信号处理、卫星通信信号处理和微波通信以及很多生物系统中具有实际的应用价值。Valpola 等人将 bayesian ensemble learning 引入非线性 BSS 中达到比较好的效果,一般非线性混合信号的 Bayesian 盲处理方法是当前的研究热点之一。Pajunen 引入的自组织映射(SOM)方法通过提取非线性特征直接分离混合信号,基于核的非线性 BSS 算法、局部线性 BSS 等都备受重视。随着盲分离的各种算法的研究,其应用范围也越来越广,可用于无损图像编码、自动控制工程、数据挖掘以及文件检索等。

国内对盲信号分离问题的研究,在理论和应用方面也取得了很大的进展。近年来国内各类基金支持了盲信号处理理论和应用的项目,国内许多博士和硕士的论文是结合盲信号处理理论和应用开展的,也成立了一些研究小组,2005 年 11 月 26 日,研学论坛(<http://bbs.matwav.com>)成立了盲信号处理专版,大大方便了国内盲信号研究及应用学者交流。国内对盲处理理论及应用的研究见本章参考文献。

此外,非线性盲分离、盲解卷/均衡、盲辨识等内容的发展状况本书会在相应各章分别介绍,这里不再赘述。

4. 盲处理的发展趋势

虽然盲处理理论方法在最近几年已经获得了长足的发展,但是还有许多问题有待进一步地研究和解决。首先是理论体系待完善,实际中采用的处理算法或多或少都带有一些经验知识,对于算法的稳定性和收敛性的证明不够充分,同时,可分离性的问题也是一个值得深入研究的方面。盲处理尚有大量的理论和实际问题有待解决,列举其中一部分:源信号 pdf 的学习;盲解卷有效方法;全局收敛性问题研究;多维 ICA 问题研究;带噪声信号的有效分离方法;更有效地利用各种先验知识成功分离或提取出源信号;有效地求解传感器数少于源信号数的分离和辨识问题;非线性混合信号的盲辨识和盲分离;非平稳情况下稳健跟踪的高效算法研究;与神经网络有效地结合;在源信号个数动态变化时也能够有效工作的盲处理算法研究;变结构神经网络盲处理方法研究;学习速率自适应变化的盲处理方法;源信号的数目估计研究;源信号的数目大于观察信号的数目时 ICA 方法研究;发展计算高效的分离、卷积、均衡的自适应算法等。

另外,盲分离可同其他学科有机结合,如模糊系统理论在盲分离技术中的应用可能是一

个有前途的研究方向,盲分离技术和遗传算法相结合,可以减少计算复杂度,提高收敛速度;小波理论与盲处理的结合等。在硬件实现方面,盲分离问题也存在着极大的发展余地,例如用 FPGA 实现等。

1.2 盲信号处理的应用

近年来,盲信号处理逐渐成为当今信息处理领域中热门的课题之一,并且已经在地震勘探、移动通信、语音处理、阵列信号处理及生物医学工程等领域中显示出诱人的应用前景,特别是盲源分离技术、ICA、盲均衡、盲多用户检测的不断发展和应用最为引人注目。下面介绍盲处理应用的几个主要方面。

1. 生物医学信号处理^[21~23]

在生物医学领域,盲信号处理可应用于心电图(ECG)、脑电图(EEG)信号分离、听觉信号分析、功能磁共振图像(FMRI)分析等。例如人们常常需要从肌电图(EMG)中确定神经元细胞信号的触发模式,而 EMG 信号通常由多个特殊的传感器在人体表皮处测得,从信号源到传感器之间的信号传输介质参数是未知的,且人们之间各不相同。目前已经有一些学者将盲分离技术成功地应用于脑电图等信号的数据处理。再如对胎儿心电图信号的处理,由于从孕妇身上测得的 ECG 信号实际上包含了孕妇和胎儿各自的 ECG 信号,且传输介质参数未知,这同样又是一个盲信号分离的典型实例,通过使用盲信号分离方法,可将孕妇和胎儿各自的 ECG 信号分离开来,从而为诊断提供准确数据。

2. 阵列信号处理领域^[6,24]

在阵列传感器中,各传感器接收到混合信号,而源信号及混合特性完全未知,这是典型的盲信号处理应用问题。海洋声呐探测中也存在这种情况,而且信号的传输介质(海洋)同样也是未知且时变的。

在军事领域,雷达的作用越来越重要。但是随着现代电子侦察技术的发展,传统的主动雷达为了探测目标必须发出电波信号,很容易因暴露自己而遭到攻击,所以使用受到很大限制。相反,近年来发展起来的被动“雷达”(暂且称其为雷达)由于只接收信号而不发出任何信号就可以探测到目标,因而受到各国的广泛重视。实际上,这种被动雷达工作的基本原理就是盲信号处理技术。近几年我国对隐身飞机探测研究所取得的成就也正是将盲信号处理领域的最新研究成果应用于上述这类被动雷达的一个具体生动的例子。

3. 语音识别、图像处理领域^[7,11,23,25]

语音信号分离、语音识别是盲处理应用的一个重要领域。最典型的应用就是声控计算机,计算机所接收到的语音指令肯定是带有各种环境噪声的,还可能存在其他的语音信号(如有其他人在说话),而且这些信号源与接收器的相对位置也未知,计算机需要在这种情况下识别出正确的语音命令。很显然,这又是一个典型的盲信号分离应用。“鸡尾酒会”语音信号分离更是经典的盲分离应用,也待深入研究。在移动通信中,往往存在通信质量问题,极大地影响了通话效果,而盲源分离或盲均衡技术能够消除噪声、抑制干扰及增强语音,提高通话质量。盲多用户检测及盲波束形成等也得到快速发展。

盲信号分离同样可以应用于二维数据,如图像滤波、图像增强等处理。在图像恢复和重构问题中,主要任务就是从被污染的图像中恢复出图像原本的面目,消除获取图像时各种因